

ОПТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ АСТЕРОИДОВ И МЕТЕОРИТОВ. ОСОБАЯ РОЛЬ СПЕКТРОФОТОМЕТРИИ

Бусарев В.В.

МГУ им. М.В. Ломоносова, Гос. астрономический институт им. П.К. Штернберга, г. Москва,
busarev@sai.msu.ru

Фотометрия, спектрофотометрия и поляриметрия – традиционные оптические методы дистанционных исследований твердых небесных тел (ТНТ), как правило, безатмосферных. При наличии у ТНТ даже разреженной атмосферы данные, полученные с применением указанных методов, подвергаются значительным искажениям. Эти методы независимы и взаимно дополняют друг друга. Характерной особенностью всех ТНТ, облегчающей их изучение оптическими методами, является наличие на поверхности раздробленного материала. Рассеяние света на твердых частицах (вплоть до самых маленьких размеров, что делает их полупрозрачными) обеспечивает возможность определения не только формы, структуры, пористости и других параметров частиц, но также и химико-минерального состава. Как следует из лабораторных измерений и астрофизических наблюдений, фотометрия и поляриметрия наиболее эффективны при изучении физических параметров ТНТ (от микро до макромасштаба), а спектрофотометрия (или спектроскопия), позволяет осуществить качественную, а иногда и количественную, оценку состава вещества этих тел.

Спектрофотометрия позволяет получить спектр отражения всей видимой полусферы достаточно удаленного ТНТ, наблюдаемого как точечный объект. Именно таковы условия видимости всех астероидов, наблюдаемых с земной поверхности в телескоп. Следует также отметить, что спектральный диапазон оптической прозрачности земной атмосферы заключен примерно между 350 и 1000 нм. В указанном диапазоне астероид только отражает солнечное излучение, поэтому используется такая его характеристика, как «спектр отражения», представляющий собой измеренный спектр объекта, деленный на усредненный спектр Солнца (или спектр стабильной по светимости звезды солнечного типа, наблюдаемой на близких воздушных массах с астероидом в течение одной ночи). Оказалось, что спектр отражения (нормированный на длине волны 550 нм) характеризует преимущественно состав вещества астероида. Данный факт подтверждается спектральными и геохимическими исследованиями метеоритов – вероятных фрагментов астероидов – и наиболее распространенных земных минералов, которые показали, что особенности спектров отражения этих материалов в диапазоне ~200–2500 нм характеризуют

химию и минералогию их вещества. В частности, было установлено, что в диапазоне 350–1100 нм находятся две самые сильные в силикатном веществе полосы поглощения (ПП): полоса переноса электронного заряда кислород-металл с минимумом в ультрафиолетовом (УФ) диапазоне (у 200 нм) и пироксен-оливиновая с минимумом у 1000 нм. Более интенсивная УФ-полоса в основном зависит от степени окисления силикатного вещества, а ее длинноволновое крыло определяет наклон и форму спектра отражения твердого тела во всем видимом диапазоне [Loeffler, 1974; Burns, 1993]. ПП у 1000 нм, возникающая при разрешенных по спине электронных переходах в катионах Fe^{2+} в кристаллическом поле, является суперпозицией ПП, свойственных таким распространенным минералам, как ортопироксен (ПП с центром у 900 нм), клинопироксен (у 1000 нм) и оливин (у 1010 нм) [Adams, 1975; Платонов, 1976; Бахтин, 1985]. Катион Fe^{2+} (электронная конфигурация $3d^6$) также дает серию слабых ПП в кристаллическом поле пироксенов (400–700 нм) и оливинов (400–650 нм) [Бахтин, 1985], которые имеют важное значение для уточнения химико-минералогической интерпретации спектров отражения астероидов. ПП, характерные для гидратированного или высоко-окисленного твердого вещества, наблюдаются у 700–800 нм (вследствие электронного переноса заряда $\text{Fe}^{2+} \rightarrow \text{Fe}^{3+}$) [Платонов, 1976; Бахтин, 1985; Burns, 1993] и у 440 нм (при электронных переходах в Fe^{3+} в кристаллическом поле) [Busarev et al., 2015]. Интересно, что при повышенном содержании Fe_2O_3 в земных пироксенах и оливинах, первая из этих полос может даже маскировать их диагностическую ПП у 1000 нм [Adams, 1975]. По причине значительного содержания гидросиликатов в углистых хондритах, интенсивная ПП с центром между 700–900 нм придает их спектрам отражения характерную вогнутую форму во всем диапазоне ~500–1000 нм.

Первая чисто спектральная классификация астероидов Дэвида Толена [Tholen, 1984] сразу «попала в точку». Она была выполнена статистическим методом «главных компонент» по данным об отражательной способности примерно 600 астероидов, полученных при их 8-цветном обзоре (ECAS) (с помощью последовательных измерений светового потока от каждого объекта в 8 светофильтрах, распределенных в диапазоне 350–1000 нм) и позволила сразу выделить 14

спектральных классов этих тел [Tholen, 1984]. Причем данные о геометрическом альбедо (p_v) потребовались только для разделения 3 из этих классов (Е, М и Р) по причине близкого сходства их спектров. На момент появления этой классификации уже было несколько других классификаций астероидов по разным наборам их параметров, таких как показатели цвета, геометрическое альбедо, линейная поляризация ($U-B$, $B-V$, p_v , P и др.), с помощью которых удалось выделить ряд таксономических (систематических) классов. Но во всех этих классификациях отсутствовало объяснение физического смысла деления астероидов на классы. Классификация же Толена получила свое обоснование с помощью сопоставления усредненных спектров астероидов каждого таксономического класса и спектральных характеристик образцов-аналогов с известным химико-минеральным составом [Tholen, 1984; Gaffey et al., 1989].

Новый спектральный обзор ~1500 астероидов (SMASS) был выполнен на более совершенном техническом уровне (с использованием ПЗС-матрицы в качестве регистратора спектра), с более высокими точностью (S/N) и спектральным разрешением (до 1 нм); при этом каждый спектр уже регистрировался одновременно во всем спектральном диапазоне 430–920 нм [Bus, Binzel, 2002a]. По данным этого обзора была проведена новая спектральная классификация астероидов с учетом наличия в их спектрах отражения более слабых ПП (причем, как и в классификации Толена, для выделения классов был использован метод главных компонент) и были определены уже 26 спектральных классов [Bus, Binzel, 2002b]. Но оказалось, что примерно половина из них не являются абсолютно новыми, а представляют собой подтипы ранее известных классов. Важно подчеркнуть, что с помощью спектральных классификаций Толена [Tholen, 1984] и Бас-Бинзела [Bus, Binzel, 2002b] удалось установить соответствие основных особенностей спектров отражения астероидов с их предполагаемой минералогией [Gaffey et al., 1989], и значит, с температурой и другими физико-химическими параметрами условий формирования их родительских тел в ранней Солнечной системе. Это также позволило изучить строение Главного пояса астероидов по составу вещества, которое оказалось связанным не только с ранней тепловой эволюцией малых планет при распаде короткоживущих изотопов, но и с динамическими процессами формирования астероидов и больших планет.

Наряду с астрофизическими наблюдениями астероидов и их спектральной классификацией в последние несколько десятилетий осуществлялись более детальные лабораторные исследования образцов-аналогов, в первую очередь, метеоритов. При

этом было обнаружено, что есть ряд «критических» параметров (световой фазовый угол, размер частиц исследуемого образца, температура и «космическая зрелость» вещества), которые в некоторых случаях ставят под сомнение достоверность определения химико-минерального состава вещества астероидов с помощью спектрофотометрии.

В докладе будет дано обоснование достоверности спектрального метода оценки вещества астероидов в наиболее часто используемом диапазоне 400–1000 нм с учетом перечисленных проблем. Кроме того, будет рассмотрена возможность количественного моделирования состава вещества астероидов по их спектрам отражения по имеющимся базам спектральных и других данных об образцах-аналогах.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бахтин А.И. Породообразующие силикаты: оптические спектры, кристаллохимия, закономерности окраски, типоморфизм. Казань: Издат. Казанского ун-та, 1985. 192 с.
2. Платонов А.Н. Природа окраски минералов. Киев: Наукова думка, 1976. 264 с.
3. Adams J.B. Interpretation of visible and near-infrared diffuse reflectance spectra of pyroxenes and other rock-forming minerals. In: Infrared and Raman spectroscopy of lunar and terrestrial minerals / Ed. Karr C., New York: Academic Press, 1975. P. 91-116.
4. Burns R.G. Mineralogical applications of crystal field theory. New York: Cambridge Univ. Press, 1993. 224 p.
5. Bus S.J., Binzel R.P. Phase II of the Small Main-Belt Asteroid Spectroscopic Survey. The Observations // Icarus. 2002a. V. 158. P. 106-145.
6. Bus S.J., Binzel R.P. Phase II of the Small Main-Belt Asteroid Spectroscopic Survey. A Feature-Based Taxonomy // Icarus. 2002b. V. 158. P. 146-177.
7. Busarev V.V., Barabanov S.I., Rusakov V.S. et al. Spectrophotometry of (32) Pomona, (145) Adeona, (704) Interamnia, (779) Nina, (330825) 2008 XE3, and 2012 QG42 and laboratory study of possible analog samples // Icarus. 2015. V. 262. P. 44-57.
8. Gaffey M.J., Bell J.F., Cruikshank D.P. Reflectance spectroscopy and asteroid surface mineralogy. In: Asteroids II / Eds Binzel R. P., Gehrels T. and Matthews M. S. Tucson: Univ. of Arizona Press, 1989. P. 98-127.
9. Loeffler B.M., Burns R.G., Tossell J.A. et al. Charge transfer in lunar materials: Interpretation of ultraviolet-visible spectral properties of the moon. In: Proc. of the Fifth Lunar Conf. 1974. V. 3. P. 3007-3016.
10. Tholen D.J. Asteroid taxonomy: From cluster analysis to photometry// Ph. D. thesis. The University of Arizona, 1984. 150 p.